

Relaties tussen mineralisatie, denitrificatie en indicatoren voor bodemkwaliteit in
landbouwgronden

Relaties tussen mineralisatie, denitrificatie en indicatoren voor bodemkwaliteit in landbouwgronden

G.L. Velthof

**Alterra-rapport 769
Sturen op Nitraat rapport nr. 6**

Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 2003

REFERAAT

Velthof, G.L. 2003. *Relaties tussen mineralisatie, denitrificatie en indicatoren voor bodemkwaliteit in landbouwgronden*. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 769. Sturen op Nitraat rapport nr. 6.; 38 blz.; .5 fig.; 3 tab.; .40 ref.

Mineralisatie en denitrificatie zijn bodemprocessen die een groot effect hebben op de hoeveelheid voor het gewas beschikbare stikstof en de stikstofuitspoeling naar grond- en oppervlaktewater. Inzicht en kwantificering van mineralisatie en denitrificatie is nodig voor een goede onderbouwing van bemestingsadviezen en instrumenten ten behoeve van het mestbeleid, zoals een indicator voor nitraatuitspoeling. In dit rapport wordt een studie beschreven naar de relaties tussen enerzijds de potentiële mineralisatie en denitrificatie en anderzijds verschillende indicatoren voor bodemkwaliteit, zoals het gehalte aan totaal stikstof en koolstof, het gehalte aan oplosbaar stikstof en koolstof en de C/N-verhouding. De analyses zijn uitgevoerd aan 459 monsters van de bovengrond van zand- en lössgronden uit het project Sturen op Nitraat. Uit de resultaten volgt dat gehalten aan oplosbaar N en C veel beter waren gerelateerd aan de potentiële mineralisatie en denitrificatie dan de overige indicatoren. Oplosbaar N en C bieden de meeste perspectieven als indicator voor mineralisatie en denitrificatie in bemestingsadviezen en instrumenten ten behoeve van het mestbeleid.

Trefwoorden: Denitrificatie, mineralisatie, bodemkwaliteit, indicator, organische stof, zandgrond, lössgrond

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door €15,- over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-rapport 769. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2003 Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte,
Postbus 47, NL-6700 AA Wageningen.
Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: info@alterra.nl

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Alterra.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Inhoud

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	13
2 Mineralisatie en denitrificatie	15
2.1 Mineralisatie	15
2.2 Denitrificatie	16
2.3 Indicatoren voor bodemkwaliteit	18
3 Materialen en methoden	19
4 Resultaten	21
4.1 Potentiële mineralisatie en potentiële denitrificatie	21
4.2 Totaal N en C	22
4.3 Oplosbaar organisch N en C	23
4.4 Hot KCl extraheerbaar ammonium	24
4.5 Relaties tussen de bodemvariabelen	24
5 Discussie	29
5.1 Effecten van grondsoort en gewas op mineralisatie en denitrificatie	29
5.2 Indicatoren voor bodemkwaliteit	30
5.3 Toepassingsmogelijkheden in Sturen op Nitraat	31
5.4 Toepassingsmogelijkheden voor bemestingsadviezen	32
5.5 Vervolg	32
Referenties	33
Bijlage 1 Samenvatting resultaten per combinatie bodemtype – gewasgroep.	37

Woord vooraf

In dit rapport wordt een studie beschreven naar de relaties tussen mineralisatie, denitrificatie en verschillende indicatoren voor bodemkwaliteit. De keuze van deze indicatoren komt voort uit eerder onderzoek uit het LNV-DWK onderzoeksprogramma 317. Het onderzoek is uitgevoerd met de bodemmonsters van het zogenaamde proefplekkenonderzoek uit het project Sturen op Nitraat. Het onderzoek is deels gefinancierd uit Sturen op Nitraat en deels uit de DWK-programma's 317 en 398-II. De gegevens uit deze studie worden ook gebruikt in Sturen op Nitraat bij het afleiden van een indicator voor niraatuitspoeling. Rapportage hiervan vindt plaats in andere rapporten uit de Reeks Sturen op Nitraat. Jaap Nelemans en Willeke van Tintelen van de sectie Bodemkwaliteit van het departement Omgevingswetenschappen van Wageningen Universiteit worden bedankt voor de analyses van de bodemmonsters. Saskia Burgers van Plant Research International wordt bedankt voor de hulp bij de statistische analyses.

Samenvatting

Mineralisatie en denitrificatie zijn twee microbiële processen die in de bodem optreden en die een groot effect hebben op de hoeveelheid voor het gewas beschikbare stikstof (N) en de N-uitspoeling naar grond- en oppervlaktewater. De bodemkwaliteit en met name de hoeveelheid en kwaliteit van organische stof heeft een groot effect op beide processen. In het kader van het Nederlandse mestbeleid moeten de verliezen via N-uitspoeling uit landbouwgronden naar grond- en oppervlaktewater sterk worden beperkt. Inzicht en kwantificering van mineralisatie en denitrificatie is hiervoor belangrijk. Hiertoe kan gebruik worden gemaakt van indicatoren voor bodemkwaliteit. Bodemkwaliteit is een breed begrip waaronder allerlei gebruiksfuncties van de bodem en bodemchemische, -fysische en -biologische eigenschappen vallen. In dit rapport wordt een deel van de bodemkwaliteit beschouwd, namelijk de afbreekbaarheid van organische stof in landbouwgronden (mineralisatie en denitrificatie) en relaties met mogelijke indicatoren.

Er zijn relaties onderzocht tussen enerzijds de potentiële mineralisatie¹ en potentiële denitrificatie² en anderzijds mogelijke indicatoren voor bodemkwaliteit, namelijk het gehalte aan totaal N en C, oplosbaar N en C (in 0,01 M CaCl₂), de verhouding $C_{\text{totaal}}/N_{\text{totaal}}$, de verhouding $C_{\text{oplosbaar}}/N_{\text{oplosbaar}}$ en het KCl extraheerbaar ammonium. De analyse is uitgevoerd met de bovengrond (0-10 cm van grasland en 0-25 cm van bouw- en maïsland) van zand- en lössgronden uit het project Sturen op Nitraat (459 monsters).

In Sturen op Nitraat wordt gezocht naar indicatoren voor nitraatuitspoeling uit landbouwgronden. Zo'n indicator zou kunnen bestaan uit een indicator voor het totale N-verlies (bijvoorbeeld de hoeveelheid minerale N in de bodem in de herfst of het N-overschot op het bedrijf of perceel) in combinatie met gegevens over gewas, bodem en hydrologie. De hoeveelheid en afbreekbaarheid van organische stof hebben een groot effect op allerlei chemische, fysische en biologische processen in de bodem, waaronder mineralisatie en denitrificatie. Het meenemen van een of meerdere indicatoren voor de kwaliteit van organische stof zou mogelijk de voorspellende waarde van de indicator voor nitraatuitspoeling kunnen verbeteren. In het onderhavige rapport worden alleen de relaties tussen potentiële mineralisatie, potentiële denitrificatie en de indicatoren voor bodemkwaliteit behandeld. Voor de analyse van de totale data-set van Sturen op Nitraat en de relaties met nitraatconcentraties in het grondwater wordt verwezen naar andere rapporten in de Reeks Sturen op Nitraat.

¹ De *potentiële N-mineralisatie* is hier gedefinieerd als de N-mineralisatie tijdens aërobe incubatie van grond bij 20 °C onder laboratoriumomstandigheden. De potentiële N-mineralisatie is een maat voor afbreekbare organische N.

² De *potentiële denitrificatie* is hier gedefinieerd als de denitrificatie tijdens incubatie van grond bij 20 °C bij een overmaat aan nitraat en onder zuurstofloze omstandigheden. De potentiële denitrificatie is een maat voor afbreekbare organische C.

De potentiële mineralisatie en denitrificatie waren hoger in grasland dan in bouw- en maïsland. Dit komt overeen met de hogere gehalten aan oplosbaar N en C in grasland dan in bouw- en maïsland, maar niet met de totaal N- en C- gehalten. Er was ook geen duidelijk verband tussen de C/N-verhouding van de organische stof en de mineralisatie. Uit de regressie-analyses volgt dat oplosbaar N en C de meeste perspectieven bieden als indicator voor mineralisatie en denitrificatie. De hoeveelheid hot KCl extraheerbaar NH_4 was minder sterk gecorreleerd met de potentiële N-mineralisatie, waarschijnlijk omdat hiermee ook minder afbreekbare organische stof wordt geëxtraheerd.

De potentiële denitrificatie was hoger in de lössgronden dan in de zandgronden, waarbij wel moet worden opgemerkt dat de data-set voor lössgronden veel kleiner was. De kans op N-verlies via denitrificatie uit de bovengrond van lössgrond is groter dan uit zandgrond. Dit wordt versterkt door de grotere kans op anaërobie in lössgrond dan in zandgrond (kleiner luchtgevuld poriënvolume en grotere kans op verslemping in lössgrond). Dit aspect is nog niet meegenomen in de discussie of lössgronden al dan niet tot de uitspoelingsgevoelige gronden behoren

De resultaten geven aan dat het grootste deel van de organische stof in bodem uit moeilijk afbreekbare organische verbindingen bestaat die geen of een beperkte rol spelen bij mineralisatie en denitrificatie. Gegevens over totaal C- en N- gehalten, alsmede de C/N-verhouding van de organische stof zijn dus minder geschikt als indicator voor de mineralisatie en denitrificatie in landbouwgronden op zand en löss. Het gehalte aan organische stof of totaal C is wel van belang uit oogpunt van andere aspecten van bodemkwaliteit, met name bodemstructuur en vochthoudend vermogen. Voor beschrijving van de bodemkwaliteit is zowel een indicator nodig voor de totale hoeveelheid organische stof (gehalte aan organische stof, totaal C of totaal N), alsmede een indicator voor de afbreekbaarheid van deze organische stof (bijvoorbeeld oplosbaar organisch N of C, potentiële mineralisatie of potentiële denitrificatie).

Het gebruik van organische N extraheerbaar met 0,01 M CaCl_2 als indicator voor N-mineralisatie en denitrificatie is perspectiefvol omdat in hetzelfde monster N-mineraal kan worden bepaald. Hierdoor kan een indicator voor de direct beschikbare N worden gecombineerd met een indicator voor N-mineralisatie en denitrificatie. Het gemiddelde gehalte aan oplosbaar organische N per combinatie bodemgewasgroep varieerde van 5 tot 12 mg N kg^{-1} en van 31 tot 50 procent van de totale hoeveelheid oplosbaar N (minerale N + organisch N). Dit betekent dat oplosbaar organische N een aanzienlijk deel kan uitmaken van de hoeveelheid mobiele N in de bovenste bodemlaag. Recentelijk is er in de wetenschappelijke literatuur veel aandacht voor de rol van opgelost organisch N in de N-kringloop van de meer natuurlijke systemen. Mogelijk is de uitspoeling van oplosbaar organisch N naar grond- en oppervlaktewater tot nu toe onderschat.

Voor de ontwikkeling van een indicator voor nitraatuitspoeling in het kader van Sturen op Nitraat wordt aanbevolen om de potentiële N-mineralisatie, de potentiële

denitrificatie, oplosbaar organisch N, oplosbaar organisch C en hot KCl extraheerbaar NH_4 mee te nemen als onafhankelijke variabelen in de statistische analyse met nitraatconcentratie in het grondwater als responsvariabele. Gezien het grote effect van vochtgehalte op denitrificatie, wordt geadviseerd om ook een interactie-term van potentiële denitrificatie en een vochtkarakteristiek (neerslagoverschot of grondwatertrap) mee te nemen. Uit deze analyse moet blijken of een van de indicatoren voor bodemkwaliteit een significante bijdrage kan leveren aan de voorspelling van de nitraatconcentratie in het grondwater.

In verschillende veldproeven in het cluster mest- en mineralenprogramma's (DWK 398) worden potentiële N-mineralisatie en potentiële denitrificatie in combinatie met mogelijke indicatoren voor bodemkwaliteit en de gewasopname bepaald. Deze resultaten zullen verder kwantitatief inzicht geven in de landbouwkundige en milieukundige toepasbaarheid van deze indicatoren voor bodemkwaliteit.

1 Inleiding

Mineralisatie en denitrificatie zijn twee microbiële processen die in de bodem optreden en die een groot effect hebben op de voor het gewas beschikbare stikstof (N) en de N-uitspoeling naar grond- en oppervlaktewater. De bodemkwaliteit en met name de kwaliteit van organische stof heeft een groot effect op beide processen. In het kader van het Nederlandse mestbeleid moeten de verliezen via N-uitspoeling uit landbouwgronden naar grond- en oppervlaktewater sterk worden beperkt. Inzicht en kwantificering van mineralisatie en denitrificatie is nodig voor een goede onderbouwing van de instrumenten en maatregelen (zowel landbouwkundig als milieukundig) die in het kader van het mestbeleid worden ingezet. Hiertoe kan gebruik worden gemaakt van indicatoren voor bodemkwaliteit. Bodemkwaliteit is een breed begrip waaronder allerlei gebruiksfuncties van de bodem en bodemchemische, -fysische en -biologische eigenschappen vallen. In het onderhavige rapport wordt een deel van de bodemkwaliteit beschouwd, namelijk de afbreekbaarheid van organische stof in landbouwgronden (mineralisatie en denitrificatie) en relaties met mogelijke indicatoren.

In deze studie zijn de relaties onderzocht tussen enerzijds de potentiële mineralisatie³ en potentiële denitrificatie⁴ en anderzijds mogelijke indicatoren voor bodemkwaliteit, namelijk het gehalte aan totaal N, totaal C, oplosbaar N en oplosbaar C, de verhouding $C_{\text{totaal}}/N_{\text{totaal}}$, de verhouding $C_{\text{oplosbaar}}/N_{\text{oplosbaar}}$ en het KCl extraheerbaar ammonium. De potentiële mineralisatie en potentiële denitrificatie kunnen zelf ook als indicator voor bodemkwaliteit worden gebruikt (Brejda et al., 2000; Franzluebbbers et al., 1995; Svensson & Pell, 2001).

De analyse is uitgevoerd met de bovengrond (0-10 cm grasland en 0-25 cm bouwland) van zand- en lössgronden uit het project Sturen op Nitraat (in totaal 459 monsters). De indicatoren kunnen worden toegepast in bemestingsadviezen en eenvoudige rekenregels, instrumenten en modellen in het kader van het mest- en mineralenbeleid. Het uiteindelijke doel is het beperken van N-verliezen en het verhogen van de N-efficiëntie door verfijning van bemestingsadviezen. Tevens kunnen deze indicatoren worden gebruikt voor bepaling van de bodemkwaliteit in landbouwgronden in combinatie met andere bodemfysische, bodemchemische en bodembioologische indicatoren.

De resultaten van het onderzoek worden tevens gebruikt in het project Sturen op Nitraat. In Sturen op Nitraat wordt gezocht naar indicatoren voor nitraatuitspoeling uit landbouwgronden (Hees et al., 2002). Zo'n indicator zou kunnen bestaan uit een indicator voor het totale N-verlies (bijvoorbeeld de minerale N in de bodem in de herfst of het N-overschot op het bedrijf of perceel) in combinatie met gegevens over gewas, bodemtype en hydrologie. Mineralisatie en denitrificatie hebben een groot effect op nitraatuitspoeling naar het grondwater. Het meenemen van indicatoren voor mineralisatie

³ De *potentiële N-mineralisatie* is hier gedefinieerd als de N-mineralisatie tijdens aërobe incubatie van grond bij 20 °C onder laboratoriumomstandigheden (Keeney, 1982; Velthof et al, 2001). De potentiële N-mineralisatie is een maat voor de hoeveelheid afbreekbare organische N.

⁴ De *potentiële denitrificatie* is hier gedefinieerd als de denitrificatie tijdens incubatie van grond bij 20 °C bij een overmaat aan nitraat en onder zuurstofloze omstandigheden (Focht, 1978; Bijay-Singh et al., 1988). De potentiële denitrificatie is een maat voor de hoeveelheid afbreekbare organische C en is de maximale denitrificatie die in het veld kan optreden.

en denitrificatie zou mogelijk de voorspellende waarde van de indicator voor nitraatuitspoeling kunnen verbeteren. In het onderhavige rapport worden alleen de relaties tussen potentiële mineralisatie, potentiële denitrificatie en de indicatoren voor bodemkwaliteit behandeld. Voor de analyse van de totale data-set van Sturen op Nitraat en de relaties met nitraatconcentraties in het grondwater wordt verwezen naar andere rapporten in de Reeks Sturen op Nitraat.

In het tweede hoofdstuk wordt een korte beschrijving gegeven van methoden voor het bepalen van mineralisatie en denitrificatie. In het derde hoofdstuk wordt de herkomst van de bodemmonsters beschreven, alsmede de verschillende toegepaste analysemethoden. In het vierde hoofdstuk volgen de resultaten van de analyses van potentiële mineralisatie en denitrificatie en de verschillende indicatoren. De discussie en toepassingsmogelijkheden van de verschillende indicatoren voor bodemkwaliteit worden in het vijfde en laatste hoofdstuk gegeven.

2 Mineralisatie en denitrificatie

2.1 Mineralisatie

Mineralisatie is het microbiële proces waarbij organische N in de bodem wordt omgezet in minerale N⁵. Immobilisatie is het tegenovergestelde proces: de microbiële vastlegging van minerale N in organische N. Het verschil tussen N-mineralisatie en N-immobilisatie heet netto N-mineralisatie. Een positieve netto mineralisatie betekent dat er netto minerale N vrijkomt uit de organische stof en een negatieve netto mineralisatie betekent dat er netto minerale N wordt vastgelegd in organische stof. In dit rapport wordt 'netto N-mineralisatie' aangeduid met 'N-mineralisatie'.

De grootte van de N-mineralisatie in landbouwgronden en het tijdstip waarop de minerale N vrijkomt is afhankelijk van een groot aantal factoren, zoals de hoeveelheid, afbreekbaarheid en de chemische samenstelling van de organische stof, temperatuur, vochtgehalte, grondgebruik, gewas en bodemtextuur. De N-mineralisatie van landbouwgronden varieert sterk: van minder dan 50 kg N ha⁻¹ jaar⁻¹ voor 'arme' bouwlandgronden tot meer dan 200 kg N ha⁻¹ jaar⁻¹ voor grasland op veengrond (Bhogal et al., 1999; Hassink, 1995).

Indien N tijdens het groeiseizoen vrijkomt, kan het gewas deze opnemen. Door de N-bemesting af te stemmen op de te verwachten N-mineralisatie kan de opname-efficiëntie van de toegediende N worden verhoogd en de verliezen via uitspoeling worden beperkt. In het bemestingsadvies van grasland wordt door middel van indeling naar N-leverend vermogen (NLV) met de N-mineralisatie rekening gehouden (www.bemestingsadvies.nl). In het bemestingsadvies voor akkerbouw wordt indirect rekening gehouden met de mineralisatie van organische stof in de bodem via onderscheid naar grondsoorten (Anon., 1999). Daarnaast worden vuistgetallen gegeven voor N-mineralisatie uit gewasresten, groenbemesters en mest.

Ook na het groeiseizoen kan N-mineralisatie optreden, met name in perioden in de herfst als de bodemtemperatuur nog relatief hoog is (hoger dan 10 °C). De in deze periode vrijgekomen N kan grotendeels tijdens de winter verloren gaan, maar dit is afhankelijk van het weer, grondsoort en eventuele aanwezigheid van een (winter)gewas. Inzicht in de mineralisatie die na het groeiseizoen optreedt, is belangrijk voor maatregelen die worden genomen voor beperken van de nitraatuitspoeling. Indicatoren voor mineralisatie kunnen mogelijk worden gebruikt bij afleiden van indicatoren voor nitraatuitspoeling naar grondwater, zoals in het project Sturen op Nitraat gebeurt.

De N-mineralisatie van gronden kan op verschillende manieren worden geschat:

- veldmethoden voor actuele N-mineralisatie (Bhogal et al., 1999);
- chemische en biologische laboratoriummethoden voor potentiële mineralisatie en indicatoren voor mineralisatie (Groot en Houba, 1995; Keeney, 1982);

⁵ Minerale N is de som van ammonium (NH₄) en nitraat (NO₃). Tijdens mineralisatie wordt organische N omgezet in NH₄, dat onder Nederlandse omstandigheden meestal snel in NO₃ wordt omgezet door middel van het micro-biologische proces nitrificatie.

- vuistgetallen en eenvoudige rekenregels voor N-mineralisatie uit recent toegediende (=binnen het voorafgaande jaar) organische meststoffen, gewasresten en groenbemesters, zoals bijvoorbeeld die uit het N-bemestingsadvies (Anoniem, 1999);
- mineralisatiemodellen waarmee de N-mineralisatie uit recent toegediende organische meststoffen, gewasresten en groenbemesters kan worden geschat (Velthof et al., 1998 en 1999; Whitmore, 1996);
- mineralisatiemodellen waarmee de totale mineralisatie (=mineralisatie van recent toegediende organische producten én de mineralisatie van de 'oude' organische stof in de bodem) kan worden berekend (Groenendijk & Kroes, 1999; Whitmore & Schröder, 1996).

Met vuistgetallen en rekenmodellen kan een redelijke schatting van de N-mineralisatie van recent toegediende organische producten worden verkregen, omdat hiernaar veel experimenteel onderzoek is verricht. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat dit onderzoek vaak is uitgevoerd in de periode dat er nog weinig restricties waren aan de bemesting. De samenstelling en afbreekbaarheid van organische producten kan zijn veranderd onder invloed van de verminderde bemesting in de laatste jaren, waardoor de vuistgetallen en rekenregels mogelijk ook in mindere mate gelden.

De 'oude' organische stof in de bodem kan echter ook een aanzienlijke bijdrage leveren aan de N-mineralisatie. Het schatten van de N-mineralisatie van de 'oude' organische stof in de bodem met behulp van rekenmodellen vraagt veel informatie over het gebruik en nutriëntenmanagement van het perceel gedurende de laatste 10-20 jaar en de aard van de organische stof.

Het kwantificeren van de N-mineralisatie door middel van veldmetingen heeft als voordeel dat het onder werkelijke veldomstandigheden wordt bepaald, maar vaak bemoeilijken andere N-processen die gelijktijdig optreden (uitspoeling, denitrificatie en gewasopname) een nauwkeurige kwantificering van de N-mineralisatie.

Een andere optie voor het schatten van de N-mineralisatie is gebruik van chemische of biologische laboratoriummethoden, waarmee aan de hand van een grondanalyse een indicatie van de te verwachten N-mineralisatie kan worden verkregen. Op basis hiervan kunnen indicatoren worden afgeleid die kunnen worden geïmplementeerd in modellen, rekenregels en schema's voor bepaling van de bodemkwaliteit. De relatie tussen deze laboratoriummethoden en de N-mineralisatie moet door middel van veld- en incubatiemethoden worden vastgesteld. Een voordeel van deze methoden is dat het snelle methoden betreft die gemakkelijk zijn te standaardiseren in een laboratorium. Een nadeel van deze methoden is dat omrekeningsfactoren nodig zijn voor vertaling naar veldomstandigheden en groeiseizoen. In studies naar bodemkwaliteit wordt de potentiële mineralisatie regelmatig gebruikt als indicator voor afbreekbare organische stof en microbiële activiteit (Brejda et al., 2000; Franzluebbers et al., 1995; Svensson & Pell, 2001)

2.2 Denitrificatie

Denitrificatie is het microbiële proces waarbij nitraat (en nitriet) in de bodem wordt omgezet tot de gasvormige verbindingen luchtstikstof (N_2) en het broeikasgas lachgas (N_2O). Denitrificatie verloopt alleen tijdens zuurstofloze (anaërobe omstandigheden) in de bodem. De energiebron voor denitrificerende bacteriën is gemakkelijk afbreekbare

organische stof (in diepere bodemlagen ook ijzersulfide; pyriet). Gemeten denitrificatieverliezen in Nederlandse landbouwgronden variëren van minder dan 10 tot ongeveer 100 kg N per ha per jaar (Koops et al., 1996; De Klein & Logtestijn, 1994; Van Beek et al., 2003), maar balansberekeningen suggereren veel hogere verliezen via denitrificatie. In intensieve groenteteelt in Californië met een hoge N-bemesting en relatief hoge temperaturen bedroegen de gemeten denitrificatieverliezen meer dan 200 kg N per ha (Ryden and Lund, 1980).

Er zijn verschillende methoden waarmee denitrificatie kan worden gekwantificeerd

- het opstellen van N-balansen, waarbij denitrificatie de restpost is;
- meting met behulp van acetyleen inhibitie. Acetyleen remt de omzetting van N_2O naar N_2 , waardoor het goed meetbare N_2O het enige eindproduct is van denitrificatie (Yoshinari et al., 1977);
- meting van de productie van gasvormig $^{15}\text{N}_2$ en $^{15}\text{N}_2\text{O}$, na toediening van ^{15}N -gelabeld materiaal, bijvoorbeeld nitraat (Mulvaney, 1988);
- meting van potentiële denitrificatie, die met behulp van correctiefactoren (reductiefactoren) wordt vertaald in een actuele denitrificatie (Heinen, 2003; Hénault & Germon, 2000);
- simulatiemodellen waarin denitrificatie wordt berekend in afhankelijk van factoren als nitraat, organische stof en aëratie. Deze modellen variëren van eenvoudige empirische modellen tot dynamische modellen, zoals bijvoorbeeld het model ANIMO (Groenendijk & Kroes, 1999) en de module NITDEN binnen het model FUSSIM (Conijn, 2002).

Kwantificering van denitrificatie is moeilijk omdat hiervoor geen eenvoudige meetmethoden voor veld beschikbaar zijn en er veel factoren zijn die een rol spelen, zoals zuurstofgehalte, nitraatgehalte, temperatuur en afbreekbare organische stof. Het opstellen van balansen kan inzicht geven in mogelijke denitrificatieverliezen, maar deze methode is sterk afhankelijk van de mate van nauwkeurigheid waarin de andere processen kunnen worden geschat, zoals uitspoeling, mineralisatie en gewasopname.

De acetyleeninhibitie wordt vaak toegepast en is algemeen geaccepteerd als een methode voor bepaling van denitrificatie. Echter, voor deze methode moeten monsters in het veld worden genomen en geïncubeerd onder gecontroleerde omstandigheden. Verschillende factoren kunnen leiden tot veranderingen in de denitrificatie, bijvoorbeeld door intrede van zuurstof.

Het gebruik van ^{15}N ter bepaling van de denitrificatie heeft als voordeel dat de denitrificatie in het veld gemeten kan worden in combinatie met andere processen. Nadeel van deze methode is dat ^{15}N moet worden toegediend en er uitgaan moet worden dat de toegediende ^{15}N volledig wordt gemengd met andere N-verbindingen in de bodem.

Schatting van de denitrificatie met behulp van potentiële denitrificatie gegevens, heeft als voordeel dat gebruik wordt gemaakt van een goed meetbare bodemkarakteristiek (de potentiële denitrificatie), waarmee inzicht wordt gekregen van maximale denitrificatie die in een bodem kan optreden. Voor vertaling naar actuele gegevens zijn correctiefactoren nodig, die met behulp van experimenteel onderzoek of literatuurgegevens moet worden afgeleid. Svensson & Pell (2001) hebben potentiële denitrificatie getest als mogelijk indicator voor bodemkwaliteit. Geconcludeerd werd potentiële denitrificatie een beschrijving geeft van de kwaliteit van organische C en daardoor gebruikt kan worden als

indicator voor bodemkwaliteit in een pakket met verschillende indicatoren voor bodemchemische, bodemfysische en bodembiologische factoren.

Met simulatiemodellen kunnen scenario's worden door gerekend, bijvoorbeeld het effect van vernatting op denitrificatie. Simulatiemodellen vragen meestal om gedetailleerde informatie van de bodem (bijvoorbeeld afbreekbaarheid van organische stof) die vaak niet aanwezig is. De potentiële denitrificatie kan als invoer voor afbreekbare organische stof worden gebruikt in simulatie modellen.

2.3 Indicatoren voor bodemkwaliteit

De potentiële mineralisatie en potentiële denitrificatie wijken af van de actuele mineralisatie en denitrificatie in het veld door de afwezigheid van een gewas, schommelingen in temperatuur en vochtgehalte en verstoring van het grondmonster. Deze afwijking is voor de potentiële mineralisatie geringer dan voor de potentiële denitrificatie. De potentiële denitrificatie wijkt meestal sterk af van de actuele denitrificatie in het veld omdat in het veld strikt anaërobie alleen tijdens korte perioden optreden. De potentiële denitrificatie geeft een risico op denitrificatieverliezen aan onder natte omstandigheden. Toepassing van de potentiële denitrificatie als indicator voor denitrificatieverliezen wordt verbeterd indien deze gepaard gaat met een indicator voor kans op anaërobie (bijvoorbeeld de grondwatertrap, grondsoort of neerslag).

De bepaling van potentiële mineralisatie en potentiële denitrificatie is arbeidsintensief. Mogelijk kunnen ook snelle chemische methoden als indicator worden gebruikt. De N-mineralisatie is gerelateerd aan gemakkelijk afbreekbare organische N en de potentiële denitrificatie is gerelateerd aan gemakkelijk afbreekbare organische C. Aangezien gemakkelijk afbreekbare C meestal sterk gerelateerd zal zijn aan gemakkelijk afbreekbare N, wordt verwacht dat er een sterke relatie bestaat tussen de potentiële N-mineralisatie en potentiële denitrificatie. Daardoor kan mogelijk voor beide processen dezelfde bodemkwaliteitsindicator worden gebruikt. Deze indicator zouden samen met andere gegevens (N-mineraal, grondsoort, gewas, grondwatertrap) en modellen gebruikt kunnen worden in bemestingsadviezen, indicatoren voor nitraatuitspoeling en beschrijving van bodemkwaliteit.

In deze studie is de relatie vastgesteld tussen potentiële mineralisatie, potentiële denitrificatie en verschillende bodemeigenschappen voor monsters uit de bouwvoor (0-10 cm voor grasland en 0-25 cm voor bouwland) van zand- en lössgronden uit Sturen op Nitraat. De volgende indicatoren zijn getest:

- het gehalte aan oplosbaar organisch N (extraheerbaar met 0,01M CaCl₂; Appel & Mengel, 1998; Groot & Houba, 1995; Houba et al., 2000; Velthof et al., 2001);
- het gehalte aan oplosbaar organisch C (extraheerbaar met 0,01M CaCl₂; Houba et al., 2000);
- 'hot KCl' extraheerbare NH₄ (Gianello & Bremner, 1986; Velthof et al., 2001);
- het gehalte aan totaal C;
- het gehalte aan totaal N;
- de verhouding tussen C_{totaal} en N_{totaal};
- de verhouding tussen C_{oplosbaar} en N_{oplosbaar}.

3 Materialen en methoden

Het onderzoek is uitgevoerd met de bodemmonsters van het zogenaamde proefplekkenonderzoek uit het project Sturen op Nitraat (Smit et al., 2003). In totaal zijn 476 monsters van de 0-10 cm bodemlaag van grasland en de 0-25 cm bodemlaag van maïslaan en bouwland genomen in de periode oktober 2000 tot mei 2001 (door de MKZ-crisis was het niet mogelijk om bemonstering eerder af te ronden).

Alle monsters zijn gedroogd bij 40 °C en gezeefd bij 2 mm. De potentiële mineralisatie en denitrificatie zijn bepaald nadat de monsters weer bevochtigd zijn. Verder zijn verschillende chemische bodemanalyses uitgevoerd. In tabel 1 wordt een overzicht en een korte beschrijving gegeven van de metingen die zijn uitgevoerd. Aangezien maar een beperkte hoeveelheid bodemmonster aanwezig was, zijn niet alle bepalingen uitgevoerd voor alle monsters en is van hetzelfde bodemmonster eerst de potentiële mineralisatie tijdens aërobe incubatie en daarna de potentiële denitrificatie tijdens anaërobe incubatie bepaald.

Tabel 1. Korte beschrijving van uitgevoerde analyses⁶

Bepaling	Korte beschrijving	Referentie
Potentiële mineralisatie	Incubatie van grond bij 20 °C en 60% van de vloeigrens in zakjes van polyethyleen. Potentiële mineralisatie is de toename in minerale N (0,01M CaCl ₂ in 4 weken).	Hassink (1995) Velthof et al. (2001)
Potentiële denitrificatie	Anaërobe incubatie bij 20 °C in een met nitraat aangerijkte grond met behulp van acetyleeninhibitietechniek. Meting van N ₂ O-toename met foto-acoestische gasmonitor na 1, 2 en 3 dagen. De gemiddelde potentiële denitrificatiesnelheid is de toename in N ₂ O-concentratie in 3 dagen.	Bijay-Singh et al. (1988) Velthof et al. (2001)
Totaal C	Bepaald volgens Kurmies-methode	Houba et al. (1997)
Totaal N	Spectrofotometrisch na destructie van grond met mengsel van zwavelzuur, salicylzuur en H ₂ O ₂	Houba et al. (1997)
Hot-KCl-methode	Extractie van de grond gedurende 4 uur met 2M KCl bij 100 °C. Bepaling van NH ₄ . Indicator is de toename in NH ₄ door de extractie met hot KCl ten opzicht van de initiële hoeveelheid (deze is in de onderhavige studie bepaald met extractie met 0,01M CaCl ₂).	Gianello & Bremner (1986) Groot & Houba (1995) Velthof et al. (2001)
pH	Bepaling in 0,01M CaCl ₂ -extract	Houba et al. (2000)
Oplosbaar organische N	Drogen van grond bij 40 °C, extractie met 0,01M CaCl ₂ en de bepaling organische N in extract	Groot & Houba (1995) Houba et al. (2000) Velthof et al. (2001)
Oplosbaar organische C	drogen van grond bij 40 °C, extractie met 0,01M CaCl ₂ bepaling organische C in extract	Houba et al. (2000)

In tabel 2 is een beschrijving gegeven van de verdeling van het aantal bodemmonsters over bodemgroepen en gewasgroepen. In een deel van de monsters zijn niet alle analyses uitgevoerd. In 459 monsters zijn alle analyses uitgevoerd.

⁶ Naast de parameters uit de tabel zijn ook P-totaal, 0,01 M CaCl₂-extraheerbaar P, en 0,01M CaCl₂-extraheerbaar Na bepaald in alle 476 monsters. Deze parameters waren niet gerelateerd aan mineralisatie en denitrificatie en zijn verder niet beschreven in dit rapport. Een samenvatting van de P-gegevens staat in bijlage 1.

De volgende vier bodemgroepen zijn onderscheiden; deze komt overeen met de indeling in het project Sturen op Nitraat (Smit et al., 2003):

- Lössgronden;
- Zandgronden met veel organische stof of dikke bovengrond (enkeerdgronden, moerige gronden): Zand 1;
- Zandgronden met relatief veel organische stof en een hoog leemgehalte (meeste bekeerdgronden, sommige gooreerdgronden, zandgronden met een kleidek, keileemgronden): Zand 2;
- Overige zandgronden (sommige bekeerdgronden, meeste gooreerdgronden, podzolgronden): Zand 3.

Er zijn drie gewasgroepen onderscheiden (overeenkomstig de indeling in het project Sturen op Nitraat):

- grasland;
- snijmaïs op melkveehouderijen;
- overig bouwland (zowel akkerbouwgewassen en vollegrondsgroenten); deze groep is bij de analyse van de nitraatuitspoelingsgegevens in het kader van Sturen op Nitraat verder opgesplitst in vier groepen (op basis verwachte gevoeligheid voor uitspoeling).

Tabel 2. Verdeling van het aantal monsters over bodemgroepen en gewasgroepen¹

Bodemgroep	Grasland	Maïs	Bouwland	Totaal
Löss	6	3	21/20	30/29
Zand 1	39/38	16/12	22	72
Zand 2	54	18	78	150/144
Zand 3	73/70	45/44	101/100	219/214
Totaal	172/162	82/77	222/220	476/459

¹eerste getal: Ntotaal, Ctotaal

¹tweede getal: potentiële denitrificatie, mineralisatie, hot KCl, oplosbaar N en C

4 Resultaten

4.1 Potentiële mineralisatie en potentiële denitrificatie

De gemiddelde potentiële mineralisatie per combinatie bodem-gewasgroep varieert van 0,8 mg N kg⁻¹ dag⁻¹ voor bouwland op Zand 3 tot 2,9 mg N kg⁻¹ dag⁻¹ voor grasland op lössgrond (Figuur 1 en bijlage 1). De gemiddelde potentiële denitrificatie per combinatie bodem-gewasgroep varieert van 3,0 mg N kg⁻¹ dag⁻¹ voor maïsland op Zand 3 tot 13,3 mg N kg⁻¹ dag⁻¹ voor grasland op lössgrond (Figuur 1 en bijlage 1). De potentiële mineralisatie en de potentiële denitrificatie zijn duidelijk hoger in grasland dan in maïsland en bouwland (figuur 1 en bijlage 1). Deze verschillen zijn statistisch significant ($P < 0,001$). Tussen maïsland en bouwland bestaan geen significante verschillen in potentiële mineralisatie en de potentiële denitrificatie.

De potentiële mineralisatie en potentiële denitrificatie zijn hoger op lössgronden dan op de zandgronden; dit geldt voor zowel voor grasland, maïsland als bouwland. Het verschil tussen lössgronden en zandgronden uit de groep Zand 3 in potentiële mineralisatie en potentiële denitrificatie is statistisch significant ($P < 0,001$). De verschillen in potentiële denitrificatie en mineralisatie tussen de drie groepen van zandgrond zijn klein. Voor maïsland en bouwland zijn de potentiële mineralisatie en denitrificatie iets hoger voor Zand 1 dan voor Zand 2 en 3, maar deze verschillen zijn niet statistisch significant.

Er bestaat een positief verband tussen de potentiële mineralisatie en potentiële denitrificatie (Figuur 2). De potentiële denitrificatie in twee grondmonsters was veel hoger dan die in de andere monsters⁷. Deze punten hebben een groot effect op de uitkomsten van lineaire regressie analyses met potentiële denitrificatie (in mg N kg⁻¹ dag⁻¹) als Y-variabele en potentiële mineralisatie (in mg N kg⁻¹ dag⁻¹) als X-variabele:

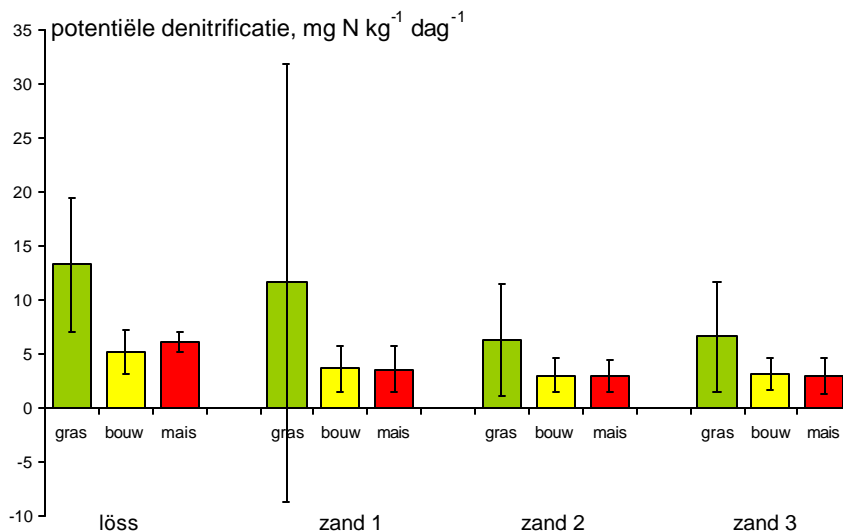
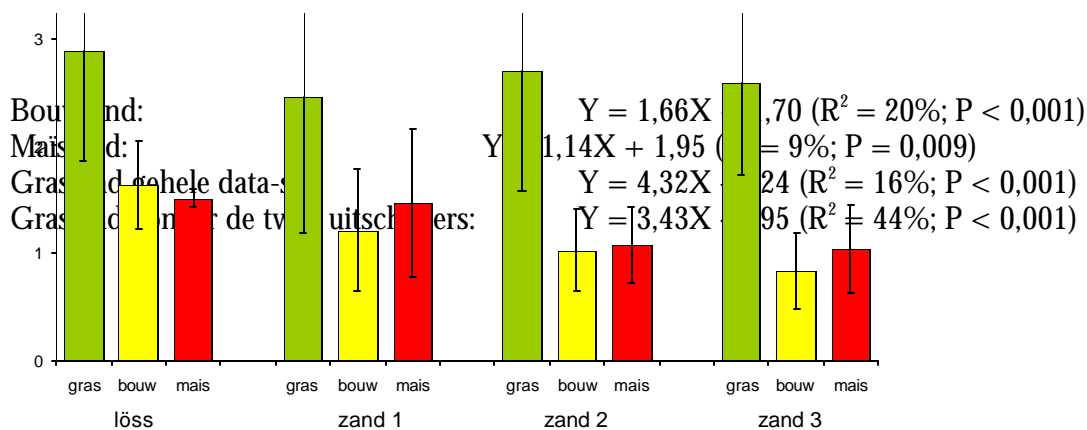
Gehele data-set: $Y = 3,26X - 0,22$ ($R^2 = 23\%$; $P < 0,001$)

Data-set zonder de twee uitschieters: $Y = 2,61X + 0,46$ ($R^2 = 48\%$; $P < 0,001$)

Uit figuur 2 blijkt dat hoge potentiële denitrificatie en mineralisatie uitsluitend worden gevonden voor grasland, zodat op basis van deze data-set geen conclusies mogen worden getrokken over het effect van gewasgroepen op de relatie tussen potentiële denitrificatie en mineralisatie.

Indien regressieanalyses afzonderlijk per gewasgroep worden uitgevoerd blijkt dat relatie tussen potentiële denitrificatie en mineralisatie voor alle gewasgroepen statistisch significant is, maar dat het percentage verklaarde variantie klein is (met name bij maïs):

⁷ het betreft hier twee monsters van hetzelfde graslandperceel behorend tot Zand 1. Gehalten aan totaal N en C, oplosbaar N en C en hot KCl extraheerbaar NH₄ en de potentiële mineralisatie waren ook hoog voor deze monsters, maar minder extreem dan bij de potentiële denitrificatie. Beschrijvingen van het bodemprofiel duiden op de aanwezigheid van veen in de laag 25-60 cm. Mogelijk dat er ook veenresten in de 0-10 cm aanwezig zijn. Blijkbaar is deze organische stof fractie zeer gemakkelijk afbreekbaar door denitrificerende bacteriën onder anaërobe omstandigheden.



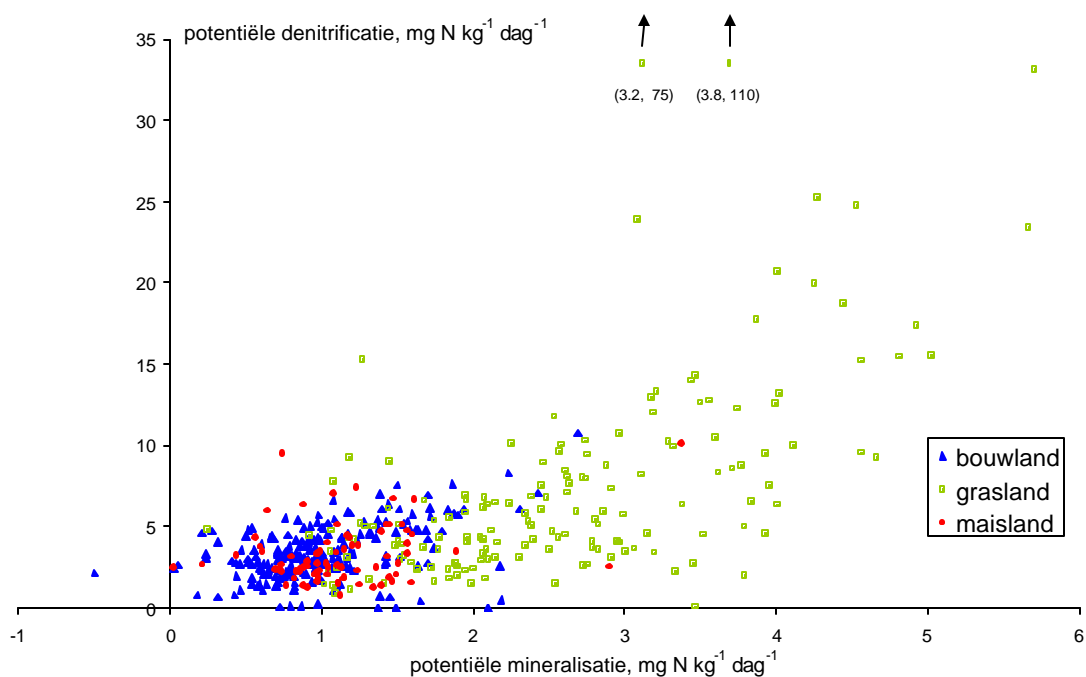
Figuur 1. Potentiële mineralisatie en potentiële denitrificatie voor de verschillende bodemgroep-gewasgroep combinaties (gemiddelde \pm standaardafwijking)

4.2 Totaal N en C

Over de gehele data-set neemt het gehalte totaal C statistisch significant af in de volgorde bouwland > grasland > maïsland (figuur 3). Dit is in tegenstelling tot het algemene beeld dat de hoeveelheid organische stof in grasland (veel) hoger is dan die in bouwland. Voor de lössgronden worden wel gemiddeld hogere gehalten aan totaal C en totaal N gevonden in grasland dan in maïsland en bouwland (figuur 3). Voor Zand 1 zijn daarentegen het gehalte aan totaal C en N hoger in bouwland en maïsland dan in grasland. Hierbij moet worden opgemerkt dat voor bouwland en maïsland de 0-25 cm laag is bemonsterd en voor grasland de 0-10 cm laag. De verschillen zouden nog groter

zijn indien voor grasland ook de 0-25 cm zou zijn bemonsterd (organisch stof gehalte neemt sterk af met de diepte in grasland). Een mogelijke verklaring voor de hogere C-gehalten in bouwland dan in grasland op Zand 1 zou kunnen zijn dat er een verstrengeling van factoren is opgetreden; bepaalde gronden met een hoog organische stof gehalte worden voornamelijk alleen voor bouwland gebruikt (zoals enkeerdgronden). Voor Zand 2 en 3 zijn totaal C en N lager voor maïsland dan voor grasland en bouwland en zijn verschillen tussen bouwland en grasland gering.

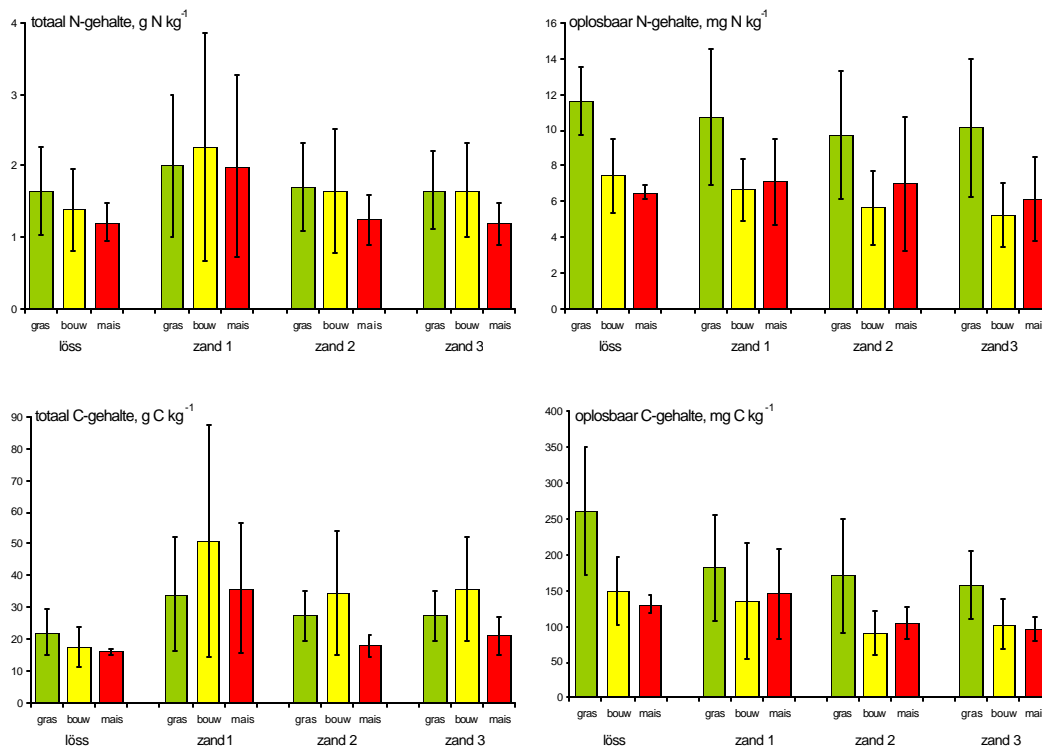
De gemiddelde C/N-verhouding is bij lössgronden 14 en er zijn geen verschillen tussen grasland, maïsland en bouwland (bijlage 1). Die voor de drie groepen zandgronden zijn duidelijk hoger dan die van löss (variërend van 15-21) en bij alle drie groepen is de C/N-verhouding van bouwland (C/N van 21-22) duidelijk (en statistisch significant; $P < 0,001$) hoger dan die van grasland en maïsland (15-18). Ook hier kan een bepaalde keuze voor een grondsoort bij de verschillende teelten een rol spelen.



Figuur 2. Relatie tussen potentiële mineralisatie en potentiële denitrificatie. Twee uitschieters (zie voetnoot 7) zijn met pijlen aangegeven

4.3 Oplosbaar organisch N en C

Het gemiddelde gehalte aan oplosbaar organische N per combinatie bodem-gewasgroep varieert van 5 tot 12 mg N kg^{-1} (figuur 3) en van 31 tot 50 procent van de totale hoeveelheid minerale N + oplosbare organisch N (bijlage 1). Voor alle bodemgroepen geldt dat de hoeveelheden oplosbaar C en oplosbaar N statistisch significant ($P < 0,001$) hoger zijn in grasland dan in maïsland en bouwland (Figuur 3). Het verschil is het grootst bij de lössgronden, maar treedt ook op in de zandgronden. De gehalten aan oplosbaar organisch N en C zijn statistisch significant ($P < 0,001$) hoger in de lössgronden en zandgronden in de groep Zand 1 dan in die uit de groepen Zand 2 en Zand 3. Er zijn geen duidelijke verschillen tussen bodemgroepen en gewasgroepen in de verhouding tussen oplosbaar C en oplosbaar N; de gemiddelde verhouding per bodem-gewas combinatie varieert van 16 tot 22 (bijlage 1).



Figuur 3. Gehalten aan totaal C en totaal N (links) en oplosbaar C en oplosbaar N (rechts) voor de verschillende bodemgroep-gewasgroep combinaties (gemiddelde \pm standaardafwijking)

4.4 Hot KCl extraheerbaar ammonium

Over de gehele data-set is "hot KCl extraheerbaar NH_4 " statistisch significant hoger ($P < 0,001$) in grasland dan in bouwland en maïsland (figuur 4). De verschillen in "hot KCl extraheerbaar NH_4 " tussen grasland enerzijds en bouw- en maïsland anderzijds zijn kleiner in Zand 1 dan in de andere bodemgroepen. Het gehalte aan hot KCl extraheerbaar NH_4 in grasland is vergelijkbaar voor de vier bodemgroepen, maar die voor maïsland en bouwland zijn duidelijk hoger in Zand 1 dan in de andere gronden. Dit verschil tussen Zand 1 en de overige gronden was niet zichtbaar bij oplosbaar organisch N. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door de hogere gehalten aan totaal N in Zand 1 (figuur 3) en het feit dat Hot KCl is een sterker extractiemiddel dan $0,01\text{ M CaCl}_2$.

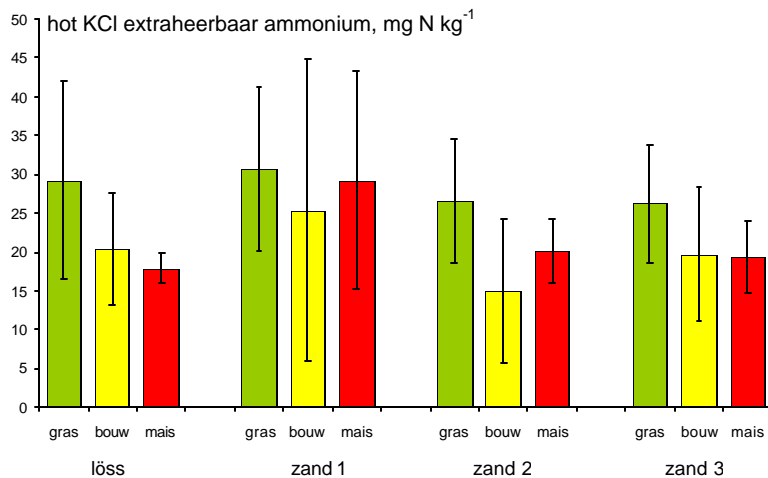
4.5 Relaties tussen de bodemvariabelen

In tabel 3 worden de resultaten van enkelvoudige regressieanalyses gegeven met potentiële mineralisatie en potentiële denitrificatie als responsvariabelen en de verschillende indicatoren als onafhankelijke variabelen. Voor potentiële denitrificatie is de regressieanalyse ook uitgevoerd waarbij de twee uitschieters (zie figuur 2) zijn weggelaten; hiervan is alleen het percentage verklaarde variantie weergegeven. Tevens worden het percentage verklaarde variantie gegeven van meervoudige regressiemodellen waarin naast de gemeten bodemeigenschappen ook de gewas-, bodem- en grondwatertrapgroepen uit Sturen op Nitraat zijn opgenomen.

De belangrijkste resultaten van de regressie-analyses zijn (tabel 3):

- de enkelvoudige regressie-modellen met het gehalte aan oplosbaar N en oplosbaar C geven zowel bij tussen potentiële mineralisatie als bij potentiële denitrificatie het hoogste percentage verklaarde variantie (figuur 5).
- er bestaat een statistische significant relatie tussen de gehalten aan totaal C, totaal N en de C/N-verhouding en de potentiële mineralisatie en denitrificatie. Het percentage verklaarde variantie is echter beperkt;
- het opnemen van gewasgroep, bodemgroep en grondwatertrapgroep leidt bij de meeste variabelen tot een hoger percentage verklaarde variantie, maar dit effect is beperkt bij oplosbaar N en oplosbaar C (met name bij potentiële denitrificatie). Dit geeft een indicatie dat oplosbaar N en oplosbaar C al een deel van de effecten van bodemtype en gewasstype op mineralisatie en denitrificatie meenemen. Dit is perspectiefvol uit oogpunt van het ontwikkelen van een indicator die onafhankelijk is van aanvullende gegevens van bodem en gewas.
- voor potentiële mineralisatie geldt dat hot KCl extraheerbaar NH_4 een betere voorspelling geeft dan totaal N en de C/N-verhouding, maar het percentage verklaarde variantie is duidelijk minder dan die van oplosbaar N en C.

Uit de regressie-analyse volgt dat oplosbaar organisch N en C de meeste perspectieven hebben als indicator voor potentiële mineralisatie en, iets minder mate, potentiële denitrificatie. Hot KCl-extraheerbaar NH_4 lijkt alleen als indicator voor potentiële mineralisatie perspectieven te bieden, met name in combinatie met de gewas- en bodemgroep. Totaal C, totaal N en de C/N-verhouding bieden minder perspectieven als indicator voor potentiële mineralisatie en denitrificatie.

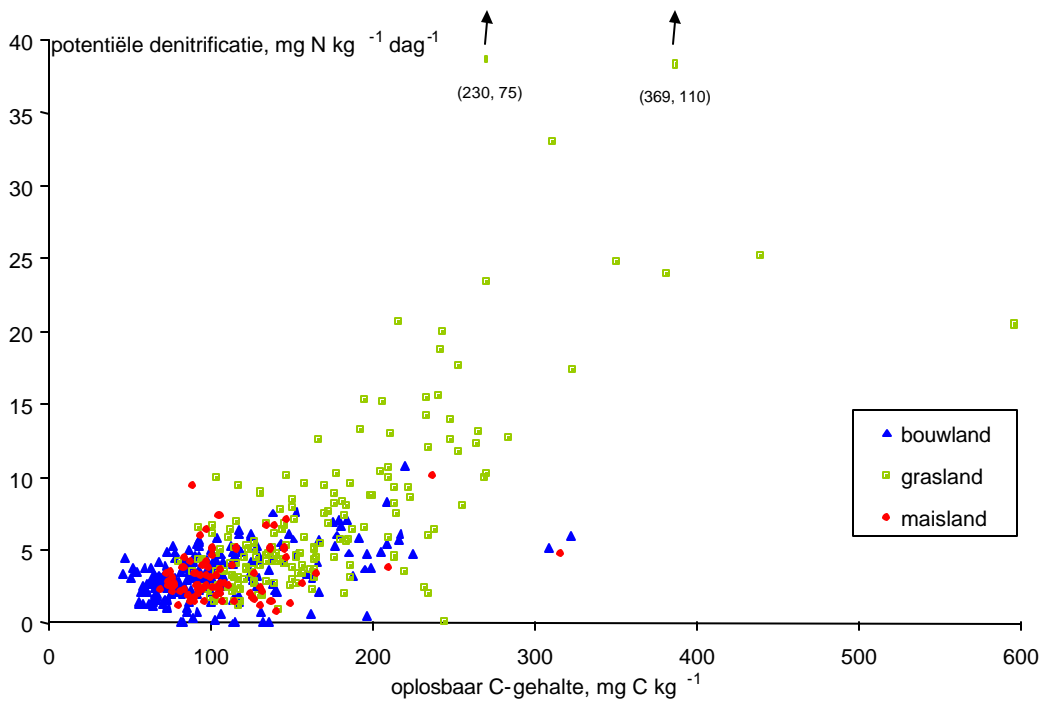
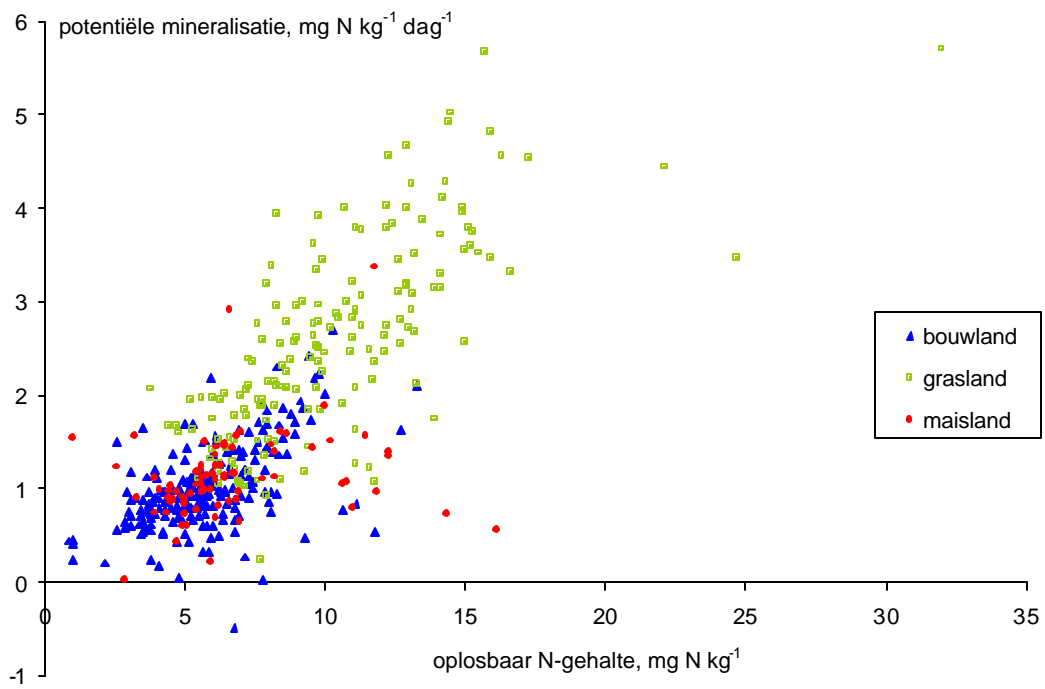


Figuur 4. Hot KCl extraheerbaar ammonium voor de verschillende bodemgroep-gewasgroep combinaties (gemiddelde \pm standaardafwijking)

Tabel 3. Regressieanalyses met potentiële denitrificatie (in mg N kg⁻¹ dag⁻¹) en mineralisatie (in mg N kg⁻¹ dag⁻¹) als responsvariabele en verschillende bodemeigenschappen als onafhankelijke variabelen. De waarden tussen haakjes zijn de percentages verklaarde varianties in regressieanalyses zonder de twee uitschieters (figuur 2). Tevens is het percentage verklaarde variantie gegeven van meervoudige regressiemodellen met naast de betreffende bodemparameter ook de bodemgroep, gewasgroep en grondwatertrapgroep als onafhankelijke variabele

Respons variabele	onafhankelijke variabele	enkelvoudige regressie analyse			meervoudige regressie ¹
		model	P	R ² , %	R ² , %
Potentiële denitrificatie, mg N kg ⁻¹ dag ⁻¹	totaal C, g C kg ⁻¹	Y = -1,920 + 0,099X	< 0,001	6 (2)	21
	totaal N, g N kg ⁻¹	Y = -1,021 + 3,614X	< 0,001	17 (14)	26
	Ctot/Ntot	Y = 10,59 - 0,302X	< 0,001	3 (11)	15
	oplosbaar C, mg C kg ⁻¹	Y = -3,601 + 0,067X	< 0,001	31 (51)	30
	oplosbaar N, mg N kg ⁻¹	Y = -2,056 + 0,936X	< 0,001	22 (44)	23
	Copl/Nopl		n.s.		15
	hot KCl NH ₄ , mg N kg ⁻¹	Y = - 1,059 + 0,271X	< 0,001	16 (20)	21
Potentiële mineralisatie, mg N kg ⁻¹ dag ⁻¹	totaal C, g C kg ⁻¹	Y = 1,378 + 0,001X	0,018	1	59
	totaal N, g N kg ⁻¹	Y = 0,830 + 0,452X	< 0,001	13	63
	Ctot/Ntot	Y = 3,147 - 0,084X	< 0,001	13	55
	oplosbaar C, mg C kg ⁻¹	Y = -0,1329 + 0,013X	< 0,001	58	74
	oplosbaar N, mg N kg ⁻¹	Y = -0,121 + 0,226X	< 0,001	61	72
	Copl/Nopl	Y = 1,841 - 0,014X	0,014	1	56
	hot KCl NH ₄ , mg N kg ⁻¹	Y = 0,399 + 0,053X	< 0,001	29	63

¹alle modellen P < 0,001



Figuur 5. Relatie tussen oplosbaar N en potentiële mineralisatie (bovenste figuur) en tussen oplosbaar C en potentiële denitrificatie (onderste figuur). Zie tabel 3 voor regressie-analyses

5 Discussie

5.1 Effecten van grondsoort en gewas op mineralisatie en denitrificatie

De potentiële mineralisatie en potentiële denitrificatie zijn hoger in grasland dan in bouwland en maïsland (figuur 1). Dit verschil geeft aan dat de organische stof in de grasland beter afbreekbaar is dan die in maïs- en bouwland. In grasland vindt ophoping van organische stof plaats, doordat er continu een gewas aanwezig is en er geen grondbewerking plaats vindt (Velthof & Oenema, 2001). De totale hoeveelheid organische stof in bodem was gemiddeld echter hoger in bouwland dan in grasland, met name op de zandgronden (figuur 3). Dit wordt mogelijk veroorzaakt door verstremgeling van factoren (bepaalde gewassen worden geteeld op bepaalde bodemtypen, bv. geen grasland op esgronden).

De lössgronden hadden gemiddeld een hogere potentiële denitrificatie en mineralisatie, een hoger gehalte aan oplosbaar N en C, een lager gehalte aan totaal N en C en een lagere C-N/verhouding dan de zandgronden. Deze gegevens duiden op een betere afbreekbaarheid van organische stof in lössgronden. Deze conclusie moet wel met enige voorzichtigheid moeten worden omgeven, omdat de data-set van lössgronden beduidend kleiner is dan die van de zandgronden (tabel 2). Het mogelijke mechanisme voor het verschil tussen löss- en zandgronden is niet duidelijk en hierover kan alleen worden gespeculeerd. De hoger potentiële denitrificatie in lössgronden duidt op een groter kans op N-verlies via denitrificatie uit de bovengrond van lössgrond dan uit zandgrond. Dit wordt versterkt door de grotere kans op anaërobie in lössgrond dan in zandgrond (kleiner poriënvolume en grotere kans op verslemping in lössgrond). Dit aspect is nog niet meegenomen in de discussie of lössgronden al dan niet tot de uitspoelingsgevoelige gronden behoren.

De potentiële denitrificatie was, uitgedrukt in $\text{mg N kg}^{-1} \text{dag}^{-1}$, hoger dan de potentiële mineralisatie (figuur 1). Voor vertaling naar een actuele denitrificatie en mineralisatie moeten de potentiële en mineralisatie en denitrificatie worden gecorrigeerd voor de temperatuur, nitraatgehalte en vochtgehalte. Beide processen zijn afhankelijk van de temperatuur en aangezien het voor een deel om de dezelfde micro-organismen gaat, zal het temperatuurseffect op mineralisatie en denitrificatie vergelijkbaar zijn. De mineralisatiesnelheid is onafhankelijk van de gehalte aan minerale N in de bodem. De denitrificatiesnelheid is afhankelijk van het nitraatgehalte en uit literatuuronderzoek blijkt dat de maximale denitrificatie pas wordt bereikt bij nitraatgehalten van enkele tientallen mg N per kg (Heinen, 2003). Deze gehalten zijn veel hoger dan die in de winter in de bovenste bodemlaag wordt gevonden (zie gegevens minerale N in bijlage 1). De voor nitraatgehalte gecorrigeerde denitrificatie zal daarom veel lager zijn dan de potentiële denitrificatie; bij de minerale N gehalten uit bijlage 1 zal dit naar schatting een factor 5 a 10 bedragen (Heinen, 2003). Het vochtgehalte in de winterperiode zal meestal optimaal zijn voor N-mineralisatie, behalve bij langdurige anaërobie in de bodem (dit treedt zelden op in de hier beschouwde gronden). Denitrificatie treedt op tijdens anaërobe omstandigheden, die dus niet vaak voorkomen in de winter. De voor het vochtgehalte gecorrigeerde denitrificatie is daarom veel lager (tot meer dan een factor 10) dan de potentiële denitrificatie. Door het sterke effect van vocht- en nitraatgehalte op denitrificatie zal de actuele denitrificatie veel lager zal zijn dan de potentiële denitrificatie (waarschijnlijk meer dan een factor 10). Het verschil tussen actuele en potentiële

mineralisatie is veel kleiner. Deze inschatting geeft in combinatie met de gegevens over potentiële denitrificatie en mineralisatie een sterke indicatie dat de actuele N-mineralisatie in de bovenste bodemlaag in de winterperiode hoger is dan de actuele denitrificatie. Er treedt dus een netto N-aanvoer op in winterperiode in bovenste bodemlaag. Of deze netto N-aanvoer ook leidt tot meer nitraatuitspoeling naar het grondwater is sterk afhankelijk zijn van de denitrificatie die optreedt in de zone tussen de onderkant van de bouwvoor en het bovenste grondwater. Uit studies blijkt dat de denitrificatie in deze zone in zandgronden laag is, uitgezonderd profielen met een veenlaagjes (Velthof et al., 2003; Zwart, 2003).

De significante relatie tussen potentiële mineralisatie en denitrificatie biedt perspectieven voor het afleiden van één indicator voor beide processen. Gronden met hoge mineralisatiecapaciteit hebben dus onder natte omstandigheden een grotere kans op denitrificatieverliezen uit de bouwvoor dan gronden met een lage mineralisatiecapaciteit. In adviezen en richtlijnen voor bemesting wordt wel op verschillende manieren rekening gehouden met mineralisatie (via tabellen, vuistgetallen en eenvoudige mineralisatie modellen), maar niet met N-verliezen door denitrificatie.

Ook bij de bepaling van de bodemkwaliteit zijn mineralisatie en denitrificatie belangrijke eigenschappen. Denitrificatie is niet alleen uit oogpunt van N-verlies van belang, maar ook als bron van het broeikas N_2O . Naarmate de potentiële denitrificatie in bodems groter is, is het risico op N_2O -emissie ook groter.

5.2 Indicatoren voor bodemkwaliteit

Uit het onderzoek blijkt een goede relatie te bestaan tussen het gehalte aan oplosbaar organische N (in 0,01 M $CaCl_2$) en de potentiële mineralisatie (tabel 3 en figuur 5). Deze resultaten komen overeen met andere studies (Appel & Mengel, 1998; Groot & Houba, 1996; Velthof et al., 2001). Het gehalte aan oplosbaar organische N is vaak echter laag en lager dan de hoeveelheid N die wordt gemineraliseerd (bijlage 1). De N die gemineraliseerd wordt, komt dus niet alleen uit de voorraad aan oplosbaar organische N maar ook uit organische N die (nog) niet in oplossing is. Ook Mengel et al. (1999) and Murphy et al. (1999) geven aan dat oplosbaar organische N een rol speelt bij N-mineralisatie, maar dat het mechanisme niet duidelijk is. Mogelijk bestaat er een soort evenwicht tussen mineraliseerbare organische stof en oplosbare organisch N in de bodem (Murphy et al., 1999).

Oplosbaar organisch N is ook een mogelijke indicator voor potentiële denitrificatie. Dit wordt veroorzaakt doordat oplosbaar organisch N gecorreleerd is met oplosbaar organisch C. Het percentage verklaarde variantie in potentiële denitrificatie door gehalte aan oplosbaar organische C was iets hoger dan die door oplosbaar organisch N (tabel 3). Ook in andere studies is gebleken dat denitrificatie in de bovengrond gecorreleerd is met oplosbaar organische C (Burford & Bremner, 1975).

Uit bijlage 1 volgt dat het gemiddelde gehalte aan oplosbaar organische N per combinatie bodem-gewasgroep varieerde van 5 tot 12 mg N kg^{-1} en van 31 tot 50 procent van de totale hoeveel oplosbaar N (minerale N + organisch N). Dit betekent dat oplosbaar organische N een aanzienlijk deel kan uitmaken van de mobiele N in de bovenste bodemlaag in de winter, maar mogelijk ook in het groeiseizoen. Recentelijk is er in de wetenschappelijke literatuur veel aandacht voor de rol van opgelost organisch N in de N-

kringloop van de meer natuurlijke systemen (Neff et al., 2003). Mogelijk is de uitspoeling van oplosbaar organisch N naar grond- en oppervlaktewater tot nu toe onderschat. Ook zijn er aanwijzingen dat planten oplosbare organische N-verbindingen kunnen opnemen.

Het gehalte aan hot KCl extraheerbaar NH_4 was minder sterk gecorreleerd met de potentiële N-mineralisatie, waarschijnlijk omdat een deel van de minder afbreekbare organische stof met deze methode wordt geëxtraheerd. Ook de hot KCl methode is in de literatuur als perspectiefvolle indicator voor N-mineralisatie beschreven (Gianello & Bremner, 1986; Smith & Li, 1993).

De hogere potentiële mineralisatie en denitrificatie in grasland dan in bouwland komen overeen met de gehalten aan oplosbaar N en C, maar niet met totaal N- en C- gehalten. Er was ook geen duidelijk verband tussen de C/N-verhouding van de organische stof en de mineralisatie. De resultaten geven aan dat het grootste deel van de organische stof in bodem uit moeilijk afbreekbare organische verbindingen bestaat die geen grote rol spelen bij mineralisatie en denitrificatie. Gegevens over totaal C- en N- gehalten, alsmede de C/N-verhouding van de organische stof zijn dus minder geschikt als indicator voor de mineralisatie en denitrificatie in landbouwgronden. Het gehalte aan organische stof of totaal C is wel van belang uit andere aspecten van bodemkwaliteit, met name uit oogpunt van structuur en vochthoudend vermogen. Voor de beschrijving van de bodemkwaliteit is dus zowel een indicator nodig voor de totale hoeveelheid organische stof (gehalte aan organische stof of C of N totaal), alsmede een indicator voor de afbreekbaarheid van deze organische stof (bijvoorbeeld oplosbaar organische N, potentiële mineralisatie of potentiële denitrificatie).

5.3 Toepassingsmogelijkheden in Sturen op Nitraat

In Sturen op Nitraat wordt gezocht naar indicatoren voor niraatuitspoeling uit landbouwgronden. Zo'n indicator zou kunnen bestaan uit een indicator voor het totale N-verlies (bijvoorbeeld de hoeveelheid minerale N in de bodem in de herfst of het N-overschot op het bedrijf of perceel) in combinatie met gegevens over gewas, bodem en hydrologie. De hoeveelheid en afbreekbaarheid van organische stof hebben een groot effect op allerlei chemische, fysische en biologische processen in de bodem, waaronder mineralisatie en denitrificatie. Mineralisatie en denitrificatie hebben een groot effect op de hoeveelheid niraat die in de winter naar het grondwater kan uitspoelen. Het meenemen van een of meerdere indicatoren voor de hoeveelheid en kwaliteit van organische stof zou mogelijk de voorspellende waarde van de indicator voor niraatuitspoeling kunnen verbeteren.

Voor de ontwikkeling van een indicator voor niraatuitspoeling in het kader van Sturen op Nitraat wordt op basis van de onderhavige studie aanbevolen om de potentiële N-mineralisatie, de potentiële denitrificatie, het gehalte oplosbaar organisch N, het gehalte oplosbaar organisch C en hot KCl extraheerbaar NH_4 mee te nemen als onafhankelijke variabelen in de statistische analyse met niraatconcentratie in het grondwater als responsvariabele. Gezien het grote effect van vochtgehalte op denitrificatie, wordt geadviseerd om ook een interactie-term van potentiële denitrificatie en een karakteristiek voor de vochttoestand (neerslagoverschot of grondwatertrap) mee te nemen. Daarnaast zouden de resultaten van de gehalten aan totaal C, totaal N en de C/N-verhouding en pH gebruikt kunnen als aanvullende (en kwantitatieve) karakterisering van de gronden. Uit de analyse van Sturen op Nitraat moet dan volgen of een van deze variabelen een

significante bijdrage leveren aan de voorspelling van de nitraatconcentratie in het grondwater. De resultaten van de statistische analyses worden gegeven in andere rapporten uit de reeks Sturen op Nitraat.

5.4 Toepassingsmogelijkheden voor bemestingsadviezen

Het gebruik van organische N extraheerbaar met 0,01 M CaCl₂ als indicator voor N-mineralisatie en denitrificatie is perspectiefvol omdat in hetzelfde monster N-mineraal kan worden bepaald. Hierdoor kan een indicator voor de direct beschikbare N worden gecombineerd met een indicator voor N-mineralisatie en denitrificatie. De 0,01 M CaCl₂ extractie methode is eenvoudig en gemakkelijk te standaardiseren in laboratoria en naast N kunnen ook andere nutriënten (en eventueel contaminanten) gelijktijdig worden bepaald (Houba et al., 2000; Van Erp, 2002.).

Op basis van oplosbaar organische N kan een schatting gemaakt worden van de te verwachten N-mineralisatie en een risico op denitrificatie in een "droog", "normaal" of "nat" groeiseizoen. Het verschil tussen N-mineralisatie en denitrificatie geeft dan een schatting van de N-levering. Deze informatie kan worden samengevat in tabellen met een bepaalde indeling naar oplosbaar organisch N-gehalte. Mogelijk dat oplosbaar organische N voor zowel grasland, maïsland en bouwland kan worden toegepast, maar hier moet nader onderzoek worden verricht.

5.5 Vervolg

Op basis van de gegevens uit de onderhavige studie zou een conceptueel bemestingsadvies gebaseerd op Nmineraal en oplosbaar organisch N kunnen worden opgesteld. Voor de verdere ontwikkeling van een indicator in bemestingsadviezen voor de N-mineralisatie en denitrificatie moeten calibratiefactoren worden afgeleid waarmee de met 0,01 M CaCl₂ extraheerbare organische N kan worden vertaald in een te verwachten netto N-mineralisatie in kg N ha⁻¹ en een kans op denitrificatie in het groeiseizoen. Deze calibratiefactoren moeten worden afgeleid uit een combinatie van veldproeven, laboratoriumproeven en modelering.

Uit de analyses van de totale data-sets van Sturen op Nitraat zal blijken in hoeverre een van de hier beschreven indicatoren van bodemkwaliteit de voorspellende waarde van een indicator voor nitraatuitspoeling op zand- en lössgronden kan verbeteren.

In verschillende veldproeven in de DWK-programma's 398 worden potentiële N-mineralisatie en denitrificatie, indicatoren voor bodemkwaliteit, alsmede gewasopname en -opbrengsten bepaald. Tevens worden rekenregels afgeleid voor de vertaling van potentiële denitrificatie naar actuele denitrificatie. Deze resultaten zullen verder kwantitatief inzicht geven in de landbouwkundige en milieukundige toepasbaarheid van potentiële mineralisatie en denitrificatie en de indicatoren voor bodemkwaliteit.

Referenties

- Anoniem (1999) Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouw- en vollegrondsgroentegewassen. PAV-publicatie 95, PAV, Lelystad 59 p.
- Appel T & Mengel K (1998) Prediction of mineralizable nitrogen in soils on the basis of an analysis of extractable organic N. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 161, 433-452.
- Beek CL van, Hummelink EWJ, Velthof GL, Oenema O (2003) Nitrogen losses through denitrification from an intensively managed grassland on peat soil. Submitted to *Biology and Fertility of Soils*
- Bhagal A, Hatch DJ, Shepherd MA & Jarvis SC (1999) Comparison of methodologies for field measurements of net mineralisation in arable soils. *Plant and Soil* 207, 15-28.
- Bijay-Singh JC, Ryden JC & Whitehead DC (1988) Some relationships between denitrification potential and fractions of organic carbon in air-dried and field-moist soils. *Soil Biology and Biochemistry* 20, 737-741.
- Brejda JJ, Karlen DL, Smith JL & Allan DL (2000) Identification of regional soil quality factors and indicators: II. Northern Mississippi Loess Hills and Palouse Prairie. *Soil Science Society of America Journal* 64, 2125-2135.
- Burford JR & Bremner JM (1975) Relationships between the denitrification capacities of soils and total, water-soluble and readily decomposable soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 7: 389-394.
- Conijn JG (2002) Improvements of the nitrification, denitrification and N₂O emission module NITDEN. *Plant Research International* 51, 22 p.
- Erp PJ van (2002) The potentials of multi-nutrient soil extraction with 0.01 M CaCl₂ in nutrient management. Proefschrift Wageningen Universiteit, 237 pp.
- Focht, DD (1978) Methods for analysis of denitrification in soils. In: Nielsen DR & MacDonald JG (eds.) *Nitrogen in the environment Vol 2* pp. 433-490, Academic Press, New York.
- Franzuebbers AJ, Zuberer DA & Hons FM (1995) Comparison of microbiological methods for evaluating quality and fertility of soil. *Biology and Fertility of Soils* 19, 135-140.
- Gianello G & Bremner JM (1986) A simple chemical method of assessing potentially available organic nitrogen in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 17, 195-214.
- Groenendijk P & Kroes JG (1999) Modelling the nitrogen and phosphorus leaching to groundwater and surface water with ANIMO 3.5. Report 144, Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, Wageningen, The Netherlands, 138 p.
- Groot JJR & Houba VJG (1995) A comparison of different indices for nitrogen mineralization. *Biology and Fertility of Soils* 19, 1-9.
- Hassink J (1995) Organic matter dynamics and N mineralization in grassland soil. Proefschrift Landbouwwuniversiteit Wageningen, 250 pp.
- Hees E, Boels D en Ten Berge H (2002) Perspectieven voor indicatoren als hulpmiddel voor het realiseren van de doelstelling van de Europese Nitraat Richtlijn, Alterra, Wageningen, Sturen op Nitraat.
- Heinen M (2003) A simple denitrification model? Literature review, sensitivity analysis, and application, Alterra rapport 690, 132 pp.
- Hénault C & Germon JC (2000) NEMIS, a predictive model of denitrification on the field scale. *European Journal of Soil Science* 51, 257-270.

- Houba VJG, van der Lee JJ & Novomzamsky I (1997) Soil analysis procedures; Other procedures (Soil and Plant Analysis, part 5B), Department of Soil Science and Plant Nutrition, Wageningen Agricultural University, Wageningen, 217 p.
- Houba VJG, Temminghoff EJM, Gaikhorst GA & Van Vark W (2000) Soil analysis procedures using 0.01 M calcium chloride as extraction reagent. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31, 1299-1396.
- Keeney DR (1982) Nitrogen-availability indices. In: Page AL, Miller RH & Keeney DR (eds.) *Methods of Soil analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*, ASA-SSSA, Madison, 711-733.
- Klein de CAM & Logtestijn RSP (1994) Denitrification and N₂O emission from urine-affected grassland soil. *Plant and Soil* 163, 235-241.
- Koops JG, Oenema O & Beusichem ML van (1996) Denitrification in the top and sub soil of grassland on peat soils. *Plant and Soil* 184, 1-10.
- Mengel K, Schneider B & Kosegarten H (1999) Nitrogen compounds extracted by electroultrafiltration (EUF) or CaCl₂ solution and their relationships to nitrogen mineralization in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 162, 139-148.
- Mulvaney RL (1988) Evaluation of nitrogen-15 tracer techniques for direct measurement of denitrification in soil: IV. Field studies. *Soil Science Society of America Journal* 52, 412-416.
- Murphy DV, Macdonald AJ, Stockdale EA, Goulding, KWT, FortuneS, Gaunt JL, Poulton PR, Wakefield JA, Webster CP & Wilmer WS (2000). Soluble organic nitrogen in agricultural soils. *Biology and Fertility of Soils* 30, 374-387.
- Neff JC, Stuart Chappin III F, PM Vitousek (2003) Breaks in the cycle: dissolved organic nitrogen in terrestrial ecosystems. *Frontiers in Ecology and Environment* 1(4): 205 – 211.
- Ryden JC & LJ Lund (1980) Nature and extent of directly measured denitrification losses from some irrigated vegetable crop production units. *Soil Science Society of America Journal* 44, 504-511.
- Smit A, Hack-ten Broeke MJD, Ten Berge HFM, Burgers SLGE, Chardon W, Van Enckevort PLA, De Gruijter JJ, Hoving IE & Velthof GL (2003) Gegevenverzameling Sturen op Nitraat. Reeks Sturen op Nitraat 3, 48 p.
- Smith KA and Li SX (1993) Estimation of potentially mineralisable nitrogen in soil by KCl extraction. I. Comparison with pot experiments. *Plant Soil* 157: 167-174.
- Svensson K & Pell M (2001) Soil microbial tests for discriminating between different cropping systems and fertiliser regimes. *Biology and Fertility of Soils* 33, 91-99.
- Velthof GL, Van Erp PJ & Steevens JCA (1998) Stikstoflevering door groenbemesters en gewasresten. Noodzaak tot verfijning stikstofadvisering. *Meststoffen 1997/1998*, 20-28.
- Velthof GL, Van Erp PJ & Steevens JCA (1999) Karakterisering en stikstofmineralisatie van organische meststoffen in een nieuw daglicht. *Meststoffen 1999*, 36-43.
- Velthof GL & Oenema O (2001) Effects of ageing and cultivation of grassland on soil nitrogen. *Alterra rapport 399*.
- Velthof GL, Oenema O en Nelemans JA (2001) Vergelijking van indicatoren voor stikstofmineralisatie in bouwland. *Meststoffen 2000*, 45-52.
- Velthof GL, Van Beek CL, Burgers SLGE, Fraters B, Groenendijk P, Hack-tenBroeke MJD, Oosterom HP, Schoumans OF, de Vries F & Zwart KB (2003) Denitrificatie in de zone tussen bouwvoor en het bovenste grondwater in zandgronden *Alterra rapport 730*.
- Whitmore AP & Schröder JJ (1996) Modelling the change in soil organic C and N and the mineralization of N from soil in response to applications of slurry manure. *Plant and Soil* 184, 185-194.

- Whitmore AP (1996) Modelling the release and loss of nitrogen after vegetable crops. Netherlands Journal of Agricultural Science 44, 73-86.
- Yoshinari T, Hynes R & Knowles R (1977) Acetylene inhibition of nitrous oxide reduction and measurement of denitrification and nitrogen fixation in soil. Soil Biology and Biochemistry 9, 177-183.
- Zwart KB (2003) Denitrificatie in de bouwvoor en de ondergrond. Resultaten van metingen in 13 profielen tot 2 m diep. Alterra rapport 724.

Bijlage 1 Samenvatting resultaten per combinatie bodemtype – gewasgroep.

		Lossgrond			Zandgrond 1			Zandgrond 2			Zandgrond 3		
		gras	bouw	mais	gras	bouw	mais	gras	bouw	mais	gras	bouw	mais
Potentiele denitrificatie, mg N/kg/dag	gem	13,3	5,2	6,1	11,7	3,6	3,6	6,3	3,1	3,0	6,6	3,2	3,0
	min	8,7	0,5	5,1	0,9	0,1	1,3	0,0	0,0	1,2	1,5	0,1	0,7
	max	25,2	10,7	6,7	110,3	8,3	10,1	24,7	6,4	7,0	33,1	7,6	9,5
	sd	6,1	2,0	0,9	20,2	2,1	2,1	5,3	1,5	1,4	5,1	1,4	1,7
Potentiele mineralisatie, mg N/kg/dag	gem	2,9	1,6	1,5	2,4	1,2	1,5	2,7	1,0	1,1	2,6	0,8	1,0
	min	1,2	1,1	1,4	0,2	0,4	0,4	1,1	0,0	0,6	1,1	-0,5	0,0
	max	4,3	2,7	1,6	5,0	2,4	3,4	5,7	2,2	1,9	5,7	1,9	2,9
	sd	1,0	0,4	0,1	1,2	0,6	0,7	1,1	0,4	0,4	0,9	0,4	0,4
Ctotaal, g C/kg	gem	22,0	17,6	16,0	34,0	50,8	35,9	27,4	34,5	18,1	27,4	36,0	21,1
	min	15,8	11,1	15,2	22,4	15,2	19,7	15,4	10,6	12,6	14,5	12,7	9,3
	max	15,8	11,1	15,2	22,4	15,2	19,7	15,4	10,6	12,6	14,5	12,7	9,3
	sd	7,2	6,2	0,8	17,9	36,6	20,4	7,8	19,7	3,5	8,0	16,4	5,9
Ntotaal, g N/kg	gem	1,7	1,4	1,2	2,0	2,3	2,0	1,7	1,6	1,2	1,7	1,7	1,2
	min	0,9	0,9	0,9	1,1	0,8	1,1	0,8	0,6	0,7	0,9	0,8	0,5
	max	2,8	2,9	1,4	5,3	7,1	6,3	3,3	4,1	1,9	4,7	3,9	1,8
	sd	0,6	0,6	0,3	1,0	1,6	1,3	0,6	0,9	0,4	0,5	0,7	0,3
C/N-verhouding	gem	14	13	14	17	21	19	17	21	15	17	22	18
	min	12	11	12	14	14	13	10	12	10	12	13	10
	max	18	15	17	22	29	26	23	31	21	26	30	44
	sd	2	1	3	3	4	3	3	5	3	3	4	5
Hot KCl ammonium, mg N/kg	gem	29	20	18	31	25	29	27	15	20	26	20	19
	min	20	11	17	10	5	18	15	0	13	12	3	4
	max	55	32	20	61	64	77	59	36	28	54	46	29
	sd	13	7	2	10	19	14	8	9	4	8	9	5
pH	gem	5,7	6,7	6,4	5,0	5,3	4,9	5,3	5,4	5,1	5,3	5,2	5,2
	min	5,1	6,0	5,8	4,1	4,9	4,4	4,6	4,6	4,5	4,5	4,3	4,5
	max	6,1	7,3	6,8	5,4	6,1	5,5	6,0	6,2	5,7	6,1	6,3	6,0
	sd	0,4	0,3	0,5	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3
Nmin, mg N/kg	gem	15	9	7	18	11	24	17	19	35	20	21	17
	min	10	3	5	4	3	5	4	3	5	5	3	4
	max	28	30	8	68	27	87	70	82	102	110	75	84
	sd	7	6	1	13	6	23	14	21	27	15	19	20
SON ¹ , mg N/kg	gem	12	7	7	11	7	7	10	6	7	10	5	6
	min	9	5	6	5	4	4	4	1	1	4	1	3
	max	14	13	7	25	10	12	17	13	14	32	9	16
	sd	2	2	0	4	2	2	4	2	4	4	2	2
SON, % van Ntotaal	gem	0,7	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,6	0,4	0,6	0,6	0,3	0,5
	min	0,5	0,4	0,5	0,2	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,4	0,1	0,3
	max	1,0	0,9	0,8	1,0	0,7	0,7	1,2	0,8	1,0	1,3	0,8	1,6
	sd	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2
SON, % van SON + Nmin	gem	46	49	50	43	41	31	43	34	22	37	31	37
	min	34	26	48	22	18	11	9	3	3	12	2	4
	max	57	67	53	67	60	61	68	60	41	59	62	63
	sd	8	11	3	14	12	16	13	15	11	10	18	15
SOC ² , mg C/kg	gem	262	149	130	182	135	146	171	91	105	157	103	96
	min	198	68	116	80	52	84	93	46	74	89	55	69
	max	439	237	140	382	322	316	597	197	147	311	225	157
	sd	89	49	13	73	81	62	80	30	23	48	35	18

		Lossgrond			Zandgrond 1			Zandgrond 2			Zandgrond 3		
		gras	bouw	mais	gras	bouw	mais	gras	bouw	mais	gras	bouw	mais
SOC/SON- verhouding	gem	22	20	20	17	19	21	18	17	21	16	22	17
	min	18	15	19	9	11	14	11	7	9	8	10	6
	max	31	24	21	29	41	38	51	68	101	22	79	41
	sd	5	3	1	4	8	6	6	8	21	3	12	5
SOC, % van Ctotaal	gem	1,2	0,9	0,8	0,6	0,3	0,5	0,6	0,3	0,6	0,6	0,3	0,5
	min	0,9	0,6	0,7	0,3	0,1	0,3	0,3	0,1	0,4	0,4	0,1	0,3
	max	1,4	1,3	0,9	1,0	0,5	1,0	1,6	0,7	0,7	1,0	0,7	0,9
	sd	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
Ptotaal, mg P/kg	gem	746	682	746	707	684	724	614	640	594	592	611	574
	min	560	533	678	380	257	413	261	284	320	264	208	133
	max	904	1279	817	1170	1187	1061	1436	1570	984	1048	1239	988
	sd	131	189	70	190	222	187	218	214	197	189	210	192
P-CaCl2, mg P/kg	gem	2,8	1,7	5,1	4,5	4,5	3,6	2,1	3,7	2,6	3,4	4,4	3,1
	min	1,3	0,6	3,9	0,5	0,4	0,4	0,1	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4
	max	4,5	3,8	5,8	9,6	12,6	6,7	7,6	13,2	9,3	12,6	14,6	12,2
	sd	1,2	0,8	1,1	2,7	3,7	2,2	1,9	2,6	2,4	3,2	3,0	2,9
verandering in SON tijdens 4 weken incubatie, mg N/kg	gem	-0,7	-0,9	-0,9	-1,9	-1,5	-2,9	-4,0	-1,4	-2,2	-4,7	-0,4	-0,7
	min	-3,9	-6,8	-2,3	-15,2	-7,8	-8,7	-15,6	-9,2	-11,7	-15,3	-7,9	-16,0
	max	4,0	3,4	-0,1	10,3	5,4	0,5	4,7	2,5	4,3	4,1	45,3	4,8
	sd	2,6	2,7	1,2	4,3	3,2	3,1	5,1	2,7	4,9	3,9	5,1	3,4
verandering in Nmin tijdens 4 weken incubatie, mg N/kg	gem	81	46	42	68	34	41	76	29	30	72	23	29
	min	33	30	41	7	12	12	30	1	17	30	-14	1
	max	120	75	45	141	68	95	159	61	53	160	52	81
	sd	29	12	2	35	16	19	31	11	10	24	10	12

¹ SON = oplosbaar organisch N (Soluble Organic N)

² SOC = oplosbaar organisch C (Soluble Organic C)